杭州地铁高架段沿线居住区植物景观特征的噪声衰减效果*

吴 昊[1] 李天劼[2] 曹志奎[3] 黄 焱[1]

1 浙江工业大学设计与建筑学院 杭州 310023
2 浙江理工大学艺术与设计学院 杭州 310018
3 浙江工业大学之江学院设计学院 浙江绍兴 312030

摘要:【目的】分析不同植物景观特征对地铁噪声衰减的影响,探讨不同因素与噪声衰减的关系,为地铁高架段沿线居住区植物景观降噪建设提供科学依据。【方法】选择杭州地铁 9 号线地铁高架段沿线居住区,测量 1~5 层的噪声响度,调查植被群落结构(包括郁闭度、绿化率、乔木最低分枝下的高度、乔木数量和有效空间遮挡系数(ESOC)),对植被景观和噪声响度进行定量评估;通过 Rhinoceros 软件创建居住区的三维模型,将其导入 Cadna/A 软件,模拟无植被场景的噪声暴露水平,计算植被净噪声衰减系数(NACV)以量化植被景观的降噪效果;应用 Python 统计程序进行线性回归分析,提出描述噪声衰减效果的数学模型。【结果】1)ESOC、郁闭度度和绿化率可以共同解释平均 NACV 的 71.6%的变化,其中 ESOC 为主要影响因素;2)NACV 值与降噪效能呈显著正相关,表明植被对噪声衰减的有效性;3)声源高度与降噪效能呈负相关,但冠层与声源同一高度,产生显著降噪效果;4)多层结构植被的降噪效能显著优于单层结构。【结论】影响降噪效果的因素排序为:植被-声源距离>噪声源高度>绿化率>ESOC,其中,植被与噪声源之间的距离对噪声衰减效应有显著影响,植被与噪声源距离越短,降噪效果更为显著。

关键词:轨道交通;噪声衰减;植被景观;空间遮挡
DOI:10.12169/zgcsly.2024.09.02.0001

Noise Attenuation Effect of Urban Vegetation Landscaping in Typical Residential Communities Along the Elevated Metro Overpass

Wu Hao[1] Li Tianjie[2] Cao Zhikui[3] Huang Yan[1]

(1. School of Design and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China; 2. School of Art and Design, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 3. School of Design, Zhijiang College of Zhejiang University of Technology, Shaoxing 312030, Zhejiang, China)

Abstract:【Objective】The effects of different plant landscape characteristics on subway noise attenuation are analyzed, and the relationship between different factors and noise attenuation is explored to provide a scientific basis for the plant landscape characteristics of residential areas along the elevated subway section. 【Method】This study focuses on residential areas located along the elevated section of Hangzhou Metro Line 9. Noise loudness levels were measured from the 1st to the 5th floors, and the vegetation community structure was investigated, including canopy closure, greening rate, height of the lowest branches of trees, number of trees, and the effective space occlusion coefficient (ESOC). A quantitative assessment was then conducted to examine the relationship between vegetation landscape characteristics and noise loudness. A

收稿日期:2024-09-02
* 基金项目:国家自然科学基金(51208467)
第一作者:吴昊(1999-),男,硕士生。研究方向为景观降噪。E-mail:1443885390@qq.com
通信作者:黄焱(1980-),男,博士,副教授。研究方向为生态景观。E-mail:huangyan@zjut.edu.cn

3D model of the residential areas was created using Rhinoceros software and imported into Cadna/A to simulate noise exposure levels in a scenario without vegetation, thereby calculating the Net Attenuation Coefficient of Vegetation (NACV) to quantify the noise reduction effect of vegetation landscapes. Linear regression analysis was performed using Python statistical programs, leading to the development of a mathematical model describing noise attenuation effects. 【Result】 ESOC, canopy density, and greening rate jointly explained 71.6% of the variation in average NACV. The factors influencing the noise reduction performance were found to rank in the following order: distance between vegetation and noise source > height of noise source > greening rate > ESOC. 【Conclusion】 Among the four key influencing factors explored, the distance between vegetation and the noise source significantly impacts noise attenuation. Specifically, a shorter distance results in a more pronounced noise reduction effect.

Keywords: Metro traffic; Noise attenuation; Vegetation landscaping; Spatial occlusion

根据世界卫生组织（WHO）的数据，噪音污染是大都市最重要的污染类型之一[1]。交通噪声是噪声类型中最明显的可感知形式。噪音对人类健康有负面影响，这种影响取决于噪声强度、暴露时间和感知[2]。长时间暴露在高水平的噪音中会导致一系列健康问题，如睡眠障碍、焦虑和抑郁[3]。城市绿地中过度暴露的噪声阻碍了其对游客的恢复性心理益处，而利用植被景观设计进行降噪是合适的解决方案之一[4]。

研究表明，随着植被与交通声源之间距离的减小，植被景观往往会吸收更多的声音[1]。在微中观尺度上，城市垂直绿化系统可用于降低噪音水平和吸收声能[5-6]；而位于噪声源和接收器之间的林带能降低接收器感知的噪声水平[7]，以及邻近的绿地可以减轻道路交通噪声暴露的影响[8]。有研究认为在绿地群落中，乔木枝下高、高度和盖度等 5 个因子与降噪相关性最高[9]；城市公路绿化带宽度在 10~20 m 处降噪量最大，且夏季降噪效果优于冬季[10]。此外，城市户外环境中的微地形能起到一定的噪声削减功能[11]。

当前研究存在的局限性主要体现在对高架道路及地铁高架段噪声特性的深入探索不足，且缺乏关于植物对不同楼层噪声衰减效应的系统性研究，特别是乔木树冠在噪声衰减中的具体作用尚未明确，亟需进一步研究。此外，对于植物对不同高度住宅的降噪研究少有。鉴于此，研究居住区环境中植物降噪策略的优化至关重要。

1 研究区概况

早期建设的杭州地铁 1 号线支线（现 9 号线）乔司南站至翁梅站区间为高架段而非地下段，尽管其建设符合《声环境质量标准》（GB3096-2008）规范，但由于高频次穿行于人口稠密区域，产生的噪音对居民生活造成潜在影响。为此，李莉等[12]建议在地铁高架段位置选择有针对性的噪声测量点，方可进行差异化研究。

试验场地位于浙江省杭州市三角丰收湖嘉园五区、二区、四区和君汇上品苑（图 1）。取每幢居民楼 1~5 层定为测点共 30 个进行噪声测定（表 1）。



注：红色矩形 A、B、C、D、E、F 代表测定的居住楼。

图 1 居住楼和地铁高架段的研究场地

表 1　采样场地

居住区名称	居民楼	编号	楼层编号(1~5 楼)
三角丰收湖嘉园五区	#11	A	A1~A5
三角丰收湖嘉园二区	#10	B	B1~B5
	#2	C	C1~C5
三角丰收湖嘉园四区	#3	D	D1~D5
君汇上品苑	#6	E	E1~E5
	#4	F	F1~F5

2　研究方法

2.1　数据采集

采用 TES-1353S 便携式声级计（TES Electrical Electronic Corp.）测量噪声，该声级计适用于记录八度中心频率和实时声压级（频率范围为 0.5~20.0 kHz，测量范围为 24.0~140.0 dB（A）），为二级声级计。选择 A 加权声级（以等效 A 声级表示）作为测量参数，以确保准确性。

于 2023 年 8 月针对 6 个场地设定绿化样地范围，采集植被特征及噪声响度数据（图 2）。为了便于统计，将乔木分为 3 类，即低乔木（1.5~4.5 m）、中乔木（4.5~7.5 m）、高乔木（7.5~10.5 m），并分别统计乔木高度（H_a）、乔木数量（M_a）、最低枝下高（K_a）（a=1、2、3）[13]（表 2）。

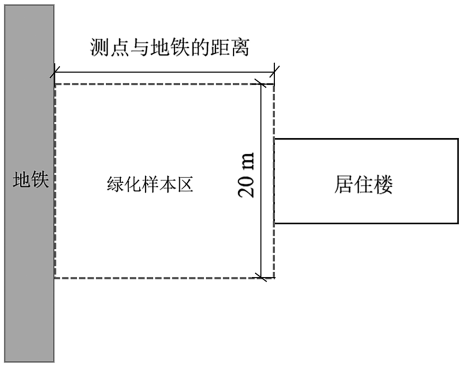


图 2　现场植被观测样本区

表 2　乔木高度分类以及乔木最低树枝下的高度

编号	平均乔木高度(H)/m			乔木数量(M)			平均最低枝下高(K)/m		
	H_1	H_2	H_3	M_1	M_2	M_3	K_1	K_2	K_3
A	4.2	6.6	7.8	2	2	1	1.8	2.32	2.9
B	3.1	6.1	8.3	8	15	10	1.07	1.94	3.2
C	4.2	6.9	9.2	9	7	17	0.92	2.5	3.9
D	3.2	5.7	8.1	1	14	6	1.53	2.1	2.8
E	3.3	5.8	9.5	13	4	15	0.86	1.78	3.6
F	3.2	6.2	9.0	12	6	12	1.77	2.8	3.4

将杭州地铁 9 号线地上列车的行驶噪声定为试验声源，逐层设置测点，把声级计垂直墙面伸出 30 cm，经校准后双机同步测量。将列车视为线声源[14]，当地铁车头行驶过测试点时开始记录数据，列车车尾驶过时停止记录数据，噪声测试仪记录本次列车通过时的噪声等效 A 声级[15]，每组重复测定 10 次，并取平均值以减少误差（图 3）。排除蝉鸣、卡车或鸟叫等场外因素所干扰的数据。尽管户外测量环境存在多种潜在影响因素，本研究已系统考虑了主要影响因素，但对于层高差异和传播路径中的局部反射等次要影响因素，因其对整体趋势分析影响较小，未作为本研究的核心关注点，以聚焦于植被遮挡与楼层噪声分布的主要关系。

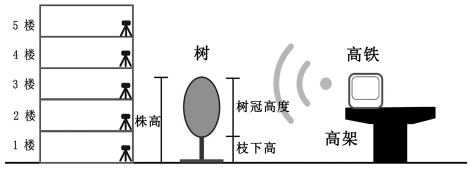


图 3　仪器放置和植被测量相关参数

2.2　预测模型建立与数据校准

Cadna/A 是基于德国 RLS90 计算模型的噪声模拟软件，该模型考虑了空气吸收、障碍物反射、植被反射和衍射等噪声传播特征[16-18]。Cadna/A 模拟的精度超过 99%，预测的 LAeq 偏差控制在±1 dB（A）以内，具有较高的可靠性与准确性[19-22]。由于受到场地条件限制，本研究采用该软件模拟无绿化条件下居民楼受地铁噪声影响的情况，预测并评估噪声水平（图 4~5）。

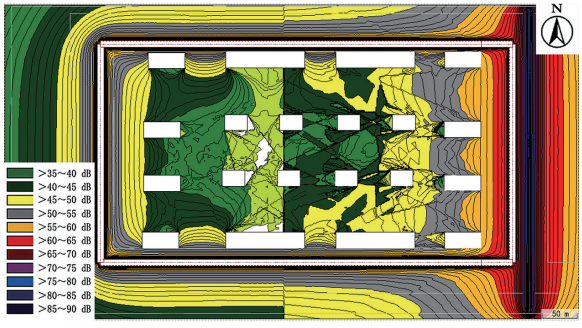


图 4　二维地图中无植被场景的模拟噪声暴露水平

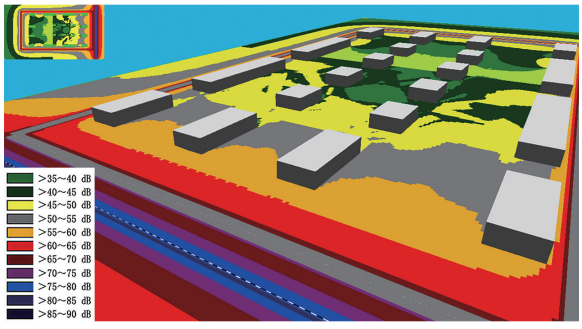


图 5　三维模型中无植被场景的模拟噪声暴露水平

在 Cadna/A 中参考杭州 9 号地铁规范设置地铁参数，列车总长约为 120 m，宽约 2.9 m，高约 3.8 m，时速为 70 km，将噪声源的高度设置为地铁高架段的高度，以线声源噪声计算等效 A 声级[23]。居住楼层高为 3 m，3D 居住区模型由 Rhinoceros7 软件构建，参数输入 Cadna/A 中，模拟精度为 2 m[24]。

为了减小 Canda/A 软件误差，采用王淑芬和任杰[15]得出的高架轨道交通沿线绿地降噪预测公式进行校准和计算，公式如下：

$$\alpha = 10\lg\frac{r_2}{r_1} \times k\left(\frac{r_2 - r_1}{\cos\theta}\right) \quad (1)$$

式（1）中：r_1为绿地前测试点与噪声源的水平距离；r_2为绿地后测试点与噪声源的水平距离；k 为绿地的噪声吸收系数；θ 为噪声源至受点的传播路径与水平面的夹角。

2.3 应用系数与计算方法

2.3.1 有效空间遮挡系数

Islam 等[25]研究显示，植物的树冠部分是有效遮挡噪音的部分。因此，利用有效空间遮挡系数（ESOC）比较不同植被景观的噪声衰减效果[26]，计算公式如下。

$$\Delta H_a = H_a - K_a \quad (2)$$

$$\Delta H_{all} = H_1 \times M_1 + H_2 \times M_2 + H_3 \times M_3 \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\Delta H_{all}}{H' \times M} \times C \quad (4)$$

式（2）~（4）中：ΔH_a为乔木空间遮挡高度；ΔH_{all}为总遮挡高度；C 为郁闭度；H'为场地高度；M 为乔木数量。

2.3.2 植被噪声净衰减系数

噪声经过无植被场地预测值 D_0与有植被场地实测值 D_1的差值，定义为植被降噪净衰减值 ΔL，它能直观反映植被的噪声衰减效果，但不能反映不同声源高度、郁闭度和枝下高等因素的综合减噪效果。

相对无植被噪声衰减值（地铁噪音实测值 D_2与无绿化场地预测值 D_0的差值）与 ΔL 之比为植被噪声净衰减系数 D_N（NACV）[27]，用于综合评估不同植被场地的减噪效能（式 5）[15]。

$$D_N = \frac{\Delta L}{D_2 - D_0} = \frac{D_0 - D_1}{D_2 - D_0} \quad (5)$$

3 结果与分析

3.1 植被结构

将高度高于不同楼层测量点高度的乔木数量记为噪声遮挡的乔木数量（NABN），所有植被层的高度分为 5 层。由表 3 可知，部分低层及中层（如 B2、B3、C3、E2、F2）NABN 值超过 15，且多为连续的乔木冠层遮挡；而部分高层（如 A4、A5、D5、E5、F5）NABN 值为 0，几乎无冠层屏蔽。

表 3 不同植被层的 NABN 值

编号	A					B					C				
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	C5
NABN	0	5	3	0	0	0	23	25	0	0	0	16	24	17	0
编号	D					E					F				
	D1	D2	D3	D4	D5	E1	E2	E3	E4	E5	F1	F2	F3	F4	F5
NABN	0	31	6	0	0	0	17	15	15	0	0	18	18	12	0

如表 4 所示，各场地植被群落结构各异。A 的种植密度低，整体种植分散，绿化率仅为 5.66%，且区域内仅有 5 棵树。B 的郁闭度为 0.36，是所有场地中最高，绿化率为 90.91%。在 C 中，种植密度繁茂，树木数量约为 33。在 D 中，植被较为分散。在 E 的绿色样本区，树层靠近地铁高架段，树枝和树叶位于上层；此外，在 E 中虽然郁闭度度为 0.23，但树木数量约为 32，整体种植密度很高，几乎没有灌木层。在 F 中，灌木层几乎不存在，与 E 相似。

此外，高 NABN 并非绿化率高场地的专属特征。例如，E、F 场地虽绿化率中等，但乔木集中分布且靠近声源，高度与地铁轨道接近，因此在部分楼层的降噪效果优于绿化率更高的 C 场地。这表明乔木的空间分布位置与冠层连续性比单纯的绿化率更能直接影响噪声衰减。

表 4　植被结构

居住楼编号	郁闭度（C）	绿化率（G）/%	灌木平均高度（H_S）/m	植物配置模式	乔木层	灌木层	地被层
A	0.06	5.66	0.97	常绿落叶乔木+常绿落叶乔木+灌木+地被	香樟（*Camphora officinarum*）	冬青卫矛（*Euonymus japonicus*）、杜鹃花（*Rhododendron simsii*）	麦冬（*Ophiopogon japonicus*）
B	0.36	90.91	0.63	常绿落叶乔木+常绿落叶乔木+灌木+地被	无患子（*Sapindus saponaria*）、银杏（*Ginkgo biloba*）、金桂（*Osmanthus fragrans* var. *thunbergii*）	红花檵木（*Loropetalum chinense* var. *rubrum*）、金叶女贞（*Ligustrum* × *vicaryi*）	鸢尾（*Iris tectorum*）、吉祥草（*Reineckea carnea*）
C	0.31	92.73	0.86	常绿落叶乔木+常绿落叶乔木+灌木+地被	香樟、无患子、鹅掌楸（*Liriodendron chinense*）、紫叶李（*Prunus cerasifera*）	红叶石楠（*Photinia* × *fraseri*）、含笑（*Michelia figo*）	吉祥草
D	0.24	33.33	1.1	常绿阔叶乔木+常绿落叶乔木+灌木+地被	红枫（*Acer palmatum*）、香樟、无患子、紫薇（*Lagerstroemia indica*）、金桂	女贞（*Ligustrum lucidum*）、冬青卫矛	狗牙根（*Cynodon dactylon*）
E	0.23	44.07	0	常绿阔叶乔木+常绿落叶乔木+地被	香樟、无患子、榉树（*Zelkova serrata*）、金镶玉竹（*Phyllostachys aureosulcata* ‘Spectabilis’）、紫薇、金桂	/	吉祥草、麦冬
F	0.35	56.45	0	常绿阔叶乔木+常绿落叶乔木+草坪	黄山栾树（*Koelreuteria bipinnata*）、香樟、无患子、金镶玉竹、紫薇、金桂	/	吉祥草、麦冬

3.2　不同空间噪声分布与 NACV 系数分析

在没有植被的情况下，地铁高架段高度接近的楼层受到的噪声影响最大，随着地面的降低或升高，噪声影响开始逐层衰减，每层噪声衰减约 0.1 dB（A）。不同居住楼的噪声影响因地铁高度和与噪声距离的不同有差异；同一居住楼，噪声影响最大的不同是有无植被。A4、A5 和 D5 的 NACV 为负值，表明实际噪声测量值大于预测噪声值（表 5）。

表 5　试验场地不同测点噪声响度和 NACV 系数

试验编号		测点高度/m	声源高度/m	与声源水平距离/m	D_1 平均噪声测量值/dB	D_0 噪声预测值/dB	植被降噪净衰减值（ΔL）	植被噪声净衰减系数（NACV）
A	A1	0	7.8	53	66.6	66.9	0.3	0.03
	A2	3			66.26	67	0.74	0.06
	A3	6			66.93	67.1	0.17	0.01
	A4	9			67.65	66.9	−0.75	−0.06
	A5	12			67.98	66.8	−1.18	−0.1
B	B1	0	3	55	62.7	66.1	3.4	0.27
	B2	3			61.42	66.2	4.58	0.37
	B3	6			61.37	66.1	4.53	0.37
	B4	9			62.2	65.9	3.7	0.29
	B5	12			63.5	65.8	2.3	0.18
C	C1	0	7.8	55	64.7	66	1.3	0.10
	C2	3			63.7	66.1	2.4	0.19
	C3	6			62.96	66.2	3.24	0.26
	C4	9			63.34	66	2.66	0.21
	C5	12			64.66	65.9	1.24	0.09
D	D1	0	7.8	55	65.14	66.2	1.06	0.08
	D2	3			64.18	66.3	2.12	0.17
	D3	6			65.28	66.4	1.12	0.09
	D4	9			65.42	66.2	0.78	0.06
	D5	12			66.54	66.1	−0.44	−0.04
E	E1	0	8.7	59	61.22	65.8	4.58	0.36
	E2	3			60.86	65.9	5.04	0.40
	E3	6			61.32	66	4.68	0.37
	E4	9			61.4	66.1	4.7	0.38
	E5	12			63.22	66	2.78	0.22
F	F1	0	8.7	62	56.83	65.7	8.87	0.69
	F2	3			56.25	65.8	9.55	0.75
	F3	6			56.74	65.9	9.16	0.72
	F4	9			57.19	66	8.81	0.70
	F5	12			58.6	65.9	7.3	0.57

结合 NABN 值（表 3）与 NACV 系数（表 5）发现，乔木遮挡数量与噪声衰减效果之间存在显著的正相关趋势。当 NABN = 0 时（如 A1、A4、A5、D1、D4、D5 等），NACV 多为低值或负值，噪声衰减效果微弱；当 NABN 较高时（如 B2 = 23、B3 = 25、C3 = 24、E2 = 17、F2 = 18），对应楼层 NACV 普遍高于同栋其他楼层，与无植被场景的模拟噪声暴露水平呈明显的负相关，表明第二、三层的植被具有噪声衰减的影响，至于对哪些楼层的影响最大可能取决于居住楼与地铁高架段之间的距离（图 6）。

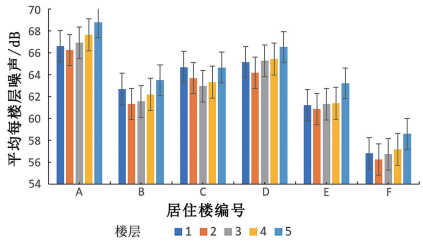


图 6 试验场地不同测点噪声响度

3.3 ESOC 系数与 NACV 系数的关系

由表 6 可知，居住楼每层平均 NACV 系数与平均噪声水平负相关，而 ESOC 与这两者的关系较弱。场地 C 的 ESOC 最高，但平均绿地净衰减系数 NACV 较低。场地 F 因地铁隔音屏障影响，平均绿地净衰减系数 NACV 最高、平均 ESOC 也较高。ESOC 排名为 C>B>F>E>D>A。除 A 和 D 外，其余场地的 ESOC 未显示植物配置对噪声衰减的效果，表明其影响小。

表 6 居住楼楼层平均 NACV 系数和 ESOC 系数的关系

试验编号	该居住楼平均噪声/dB	该居住楼平均绿地噪声净衰减系数（NACV）	有效空间遮挡系数（ESOC）
A	67. 246	0. 02	0. 018 36
B	62. 253	0. 30	0. 115 52
C	63. 872	0. 17	0. 117 75
D	65. 312	0. 08	0. 064 88
E	61. 604	0. 35	0. 083 71
F	57. 122	0. 69	0. 109 51

3.4 ESOC 系数与噪声衰减效应的关系

为了定量分析变量之间的线性关系，在 Python 3 中编写一个程序，使用 Matplotlib 包进行线性回归分析（表 7）。ESOC、郁闭度（C）、绿化率（G）被视为自变量，而平均 NACV 被视为因变量（M_N）。线性回归模型的方程见式（6）。

$$M_N = 0.063 + 3.237 \times \mathrm{ESOC} + 0.075 \times \mathrm{C} - 0.246 \times \mathrm{G} \quad (6)$$

根据式（6），ESOC、C 和 G 这 3 个因素很明显可以解释总体上平均 NACV 的 71. 6% 的变化（$R^2 = 0.716$）。此外，该场地的 ESOC 与噪声衰减效应（t = 0. 915）明显相关。

表 7 中修正 R^2 还考虑了样本量的影响。在样本量较小的情况下，模型容易被噪声干扰，R^2 的增加可能不能代表真实情况。此时，修正 R^2 提供了一个更为稳健的评估标准，能够更准确地反映模型的拟合程度。

表 7 线性回归分析

项目	非标准化系数		标准化系数	t	p	共线性诊断	
	B	标准误	贝塔系数			方差膨胀系数（VIF）	
常数	0. 063	0. 162	–	0. 392	0. 733	–	–
有效遮挡空间系数（ESOC）	3. 237	3. 538	0. 826	0. 915	0. 457	5. 746	0. 174
郁闭度（C）	0. 075	1. 084	0. 065	0. 070	0. 951	6. 117	0. 163
绿化率（G）	−0. 246	0. 211	−0. 484	−1. 164	0. 364	1. 218	0. 821
R^2	0. 716						
修正 R^2	0. 290						
变异系数（F）	F（3. 2）= 1. 680，p = 0. 394						
杜宾-瓦特森检验值（D-W）	2. 192						

注：平均 NACV 为因变量。

3.5 不同居住楼噪声影响差异

根据表 6，居住楼平均噪音响度的排名为 A>D>C>B>E>F，而平均 NACV（植被噪声净衰减系数）则反向排序。总体来看，NACV 值增高通常伴随噪音响度降低，表明植被对噪声衰减的有效性。

场地 B 和 C 植被配置相似，但 NACV（B）> NACV（C），原因是声源高度不一样，反映植被对低声源的噪声降噪效果更好，这与 Fang 和 Ling[28] 的研究对城市林带降噪效果的发现一致。

在声源高度和植物配置模式相同的情况下，场地 A 的噪声衰减效果最弱，而场地 C 的噪声衰减效果最为显著，显示出绿化率和郁闭度对降噪

的正面影响。

不同绿化面积的场地在其他条件相同的情况下，ESOC 与绿化率和郁闭度正相关，但 A、C、D 场地的 ESOC 排序与 NACV 相同，提示 ESOC 非主要降噪因素。降低树枝高度、增加植被数量与密度可强化降噪效果。

植被与声源距离增加会削弱降噪效果。尽管场地 E 的噪声源高度高，且绿化率低，但 NACV 却高于场地 C，是因场地 E 植被更接近声源且面向声源面积大，降噪更有效。

场地 E 和 F 的植被和声源高度接近，通过 NACV 可以客观评估不同场地的综合噪声衰减效果。场地 F 的 NACV 明显大于场地 E，这归因于 F 场地的地铁采取了隔音措施。

3.6　同一居住楼噪声影响差异

大部分场地都能显示出 NACV，但 A4、A5、D5 等高层区域因缺乏树冠屏蔽，噪声衰减效果甚微，验证了高密度宽幅植被对噪声衰减的必要性[29]。

根据 NABN（噪声遮挡的乔木数量）分析显示，除地面层外，第 5 层及 A4、B4、D4 楼层未受植被降噪影响，而其余楼层 NACV 较高，证明乔木树冠对噪声的有效衰减。

在同一居住楼不同楼层的植被方面，灌木在居住楼 A、B、C 和 D 的一楼生长，未受树冠阻挡。由于 A 场地的乔木稀少，A3 的 NACV 低于 A1，而其他楼层 NACV 普遍高于一楼，表明乔木树冠降噪优于灌木。

与地铁同一高度的楼层噪声最小，随楼层升降而增大，这与无植被环境中模拟噪声的趋势相反。且 A2、B3 等楼层因乔木遮挡 NACV 最大，表明噪声衰减与 ESOC 密切相关。

数据表明，ESOC、树冠闭合和绿化率共解释平均 NACV 变化的 71.6%。在影响噪声衰减效果的复杂植被结构中，ESOC 的影响力最为显著。

4　讨论

4.1　冠层与噪声源同一高度对降噪效果的影响

研究结果表明，植被与噪声源之间的距离和冠层与噪声源的高度在降噪中的作用远大于绿化率本身，尤其当乔木冠层与地铁高度相近并形成连续遮挡时，中低楼层居民获得的降噪效果最为明显，强调乔木冠层在削减交通噪声中的关键作用[28]；其次绿带宽度在道路降噪中最有效的范围为 10~20 m[5]，而研究表明，即便绿带宽度有限，只要冠层高度与噪声源在同一水平高度，依然能产生显著的降噪效果。因此，高度匹配比绿地宽度更具主导性，这为高架轨交沿线的噪声控制提供了更具针对性的解释。

4.2　植被结构与屏障结合对降噪效果的影响

绿化率并非决定性因素，即便绿量有限，只要冠层连续且保持与声源同一高度，也能产生显著的降噪效果。这说明植被的结构性特征比绿量更关键[7,9]，植被降噪依赖于林冠闭合度和空间分布[28]，而不仅是覆盖率。本研究提出的 NACV 与 ESOC 系数在一定程度上解决了以往研究中“绿化率难以反映真实降噪”的问题，更能有效揭示植被空间结构对噪声衰减的作用。对于缺乏乔木遮挡的高层住宅，建议扩大绿化面积或采用垂直绿化。其次隔声屏障与植被结合后降噪效果显著增强，相比传统的单一物理降噪屏障，植被不仅有降噪作用，还能丰富城市绿色空间，减少视觉干扰，体现其独特的景观优势[30]。

4.3　展望

未来研究应增加样本和范围，考察多种植被景观元素的效果。鉴于城市植被的多样性和复杂性，深入研究植被对噪声吸收、反射和散射的作用，为优化植被设计提供有效的科学依据。同时，本研究使用二级声级计进行噪声水平测量，尽管其符合基本测量要求，但由于其精度较一级声级计略低，可能对数据的准确性造成一定影响[31]。未来研究还应在进一步验证噪声影响控制时，优先采用一级声级计或精密校准的设备，以提高数据的可靠性。

5　结论

景观要素对噪声衰减贡献大小排序为：植被与噪声源之间的距离>噪声源的高度>绿化率>ESOC，其中植被与噪声源之间的距离在噪声衰减贡献中是最大的，植被与噪声源距离越短，降噪效果更为显著。因此，在地铁高架段沿线居住区的景观设计中，应优先在最靠近声源一侧布设与高度相匹配的乔木冠层廊带，大幅度降低地铁噪

声的影响。未来研究需更加关注不同类型的城市居住区以及多季节的系统对比，为城市景观降噪建设提供科学指导。

参考文献

[1]AKAY A,ÖNDER S.An acoustical landscaping study:the impact of distance between the sound source and the landscape plants on traffic noise reduction [J]. Environment, Development and Sustainability,2022,24(10):12036-12058.

[2]KUMAR B S,CHOWDARY V.Use of artificial neural networks to assess train horn noise at a railway level crossing in India[J]. Environmental Monitoring and Assessment,2023,195(3):426.

[3]SEIDLER A,WAGNER M,SCHUBERT M,et al.Aircraft,road and railway traffic noise as risk factors for heart failure and hypertensive heart disease: a case-control study based on secondary data [J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health,2016,219(8):749-758.

[4]YANG F,BAO Z Y,ZHU Z J,et al.An assessment of psychological noise reduction[J].Public Health,2011,8:1032-48.

[5]VAN RENTERGHEM T,THOMAS P,BOTTELDOOREN D. Landscape depressions can create silent zones in noise polluted parks [C]//INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings.Fort Washington,D.C.:Institute of Noise Control Engineering,2021.

[6]WONG N H,TAN A Y K,TAN P Y,et al.Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls [J]. Building and Environment,2010,45(2):411-420.

[7]KRAGH J.Pilot study on railway noise attenuation by belts of trees[J].Journal of Sound and Vibration,1979,66(3):407-415.

[8]GIDLÖF-GUNNARSSON A,ÖHRSTRÖM E.Noise and well-being in urban residential environments:the potential role of perceived availability to nearby green areas [J]. Landscape and Urban Planning,2007,83(2/3):115-126.

[9]张庆费,郑思俊,夏檑,等.上海城市绿地植物群落降噪功能及其影响因子[J].应用生态学报,2007,18(10):2295-2300.

[10]陈雷,张丽微,杨善云,等.夏冬两季城郊公路绿化带的降噪效果差异分析[J].环境工程学报,2017,11(9):5320-5325.

[11]吴湘萍.基于声景研究的城区铁路沿线公园优化设计策略:以京秦铁路北京中心城区段为例[D].北京:北京交通大学,2023.

[12]李莉,尹铁锋,朱茜,等.城轨高架环境噪声特性与不同频段能量[J].交通运输工程学报,2018,18(2):120-128.

[13]HAO Z Q,ZHANG J,SONG B,et al.Vertical structure and spatial associations of dominant tree species in an old-growth temperate forest[J].Forest Ecology and Management,2007,252(1/2/3):1-11.

[14]刘志武.广州岭南花园住宅区生态绿地规划的研究[M].广州:华南理工大学出版社,2002:74-85.

[15]王淑芬,任杰.北京高架轨道交通沿线绿地噪声衰减效果研究[J].中国园林,2012,28(9):68-71.

[16]苏凯,廖明旭,李林潇,等.基于道路服务水平的快速路噪声影响预测[J].安全与环境学报,2022,22(1):486-494.

[17]夏平,徐碧华,宣燕.用 Cadna/A 软件预测桥梁交通噪声及应用分析[J].应用声学,2007,26(4):208-212.

[18]QUARTIERI J,MASTORAKIS N E,IANNONE G,et al.A review of traffic noise predictive models [C]//Recent advances in applied and theoretical mechanics, 5th WSEAS international conference on applied and theoretical mechanics.Fort Puerto De La Cruz,Tenerife,Canary Islands,Spain,2009.

[19]娄金秀,马建华.基于 Cadna/A 的高层建筑环境噪声垂直分布仿真[J].噪声与振动控制,2014,34(3):136-138,181.

[20]SU K,HE Y L,CAO R,et al.Noise reduction prediction of urban road green belt based on road service level[J].Environmental Engineering and Management Journal, 2023, 22(12): 2109-2116.

[21]孙海涛,刘培杰,王红卫.基于 Cadna/A 软件的城市高架道路噪声预测[J].华南师范大学学报(自然科学版),2010,42(1):58-61.

[22]刘珊珊,陈郁,郑洪波,等.基于 Cadna/A 软件的城市道路噪声模拟[J].安全与环境学报,2019,19(6):2095-2101.

[23]POPESCU D I,TUNS R E,MOHOLEA I F.The urban acoustic environment - a survey for road traffic noise[J].Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences,2011,6(1):285-292.

[24]SONG J X,MENG Q,KANG J,et al.Effects of planning variables on urban traffic noise at different scales[J].Sustainable Cities and Society,2024,100:105006.

[25]ISLAM M N,RAHMAN K S,BAHAR M M,et al.Pollution attenuation by roadside greenbelt in and around urban areas[J]. Urban Forestry & Urban Greening,2012,11(4):460-464.

[26]HU J,GE J.Attenuation effect of city green belt and simulation on traffic noise[J].Urban Environment & Urban Ecology,2013,26:33-36.

[27]刘清臻.城市绿地减弱噪声效果分析[J].东北林学院学报,1984,12(S1):59-68.

[28]FANG C F,LING D L.Guidance for noise reduction provided by tree belts[J].Landscape and Urban Planning,2005,71(1):29-34.

[29]WATTS G,CHINN L,GODFREY N.The effects of vegetation on the perception of traffic noise[J].Applied Acoustics,1999,56(1):39-56.

[30]SONG L Z,GAO K,LIU Q M,et al.Acoustic performance of near-rail low-height noise barriers installed on suburban railway bridges[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022,29(41):62330-62346.

[31]CHUNG K.Calibration matters:I.Sound level meter basics[J]. Journal of Communication Disorders,2023,101:106300.